

# Stokastisk simulering til studie af robusthed i DSB S-tog

Michael Folkmann, datalog, cand. scient., operationsanalytiker

Torben Christensen, ingeniør, ph.d., senioranalytiker

Produktionsplanlægning, DSB S-tog a/s

## Introduktion

Denne artikel omhandler et simuleringsværktøj anvendt i planlægningen i Produktionsplanlægningsafdelingen, DSB S-tog a/s, (PPA). Værktøjet, *SimS*, tager udgangspunkt i stokastisk simulering, og er overordnet set en afvikling af en køreplan, en materielkøreplan og en tjenesteplan udsat for forskellige driftsforstyrrelser. Hensigten med simulationen er at kunne teste robustheden af samspillet mellem planerne.

Vi vil i afsnittet *Planlægningsprocessen i PPA* ridse SimS' rolle og målsætning op i PPA. I afsnittet *Grundlaget for SimS* gives et indblik i hvordan simuleringen er opbygget. De opnåede resultater, og det igangværende arbejde beskrives i afsnittet *Resultater og igangværende arbejde*, og artiklen afsluttes med et afsnit om *Aktuel tilstand for udviklingen*.

## Planlægningsprocessen i PPA

Skematisk kan det tidsmæssige forløb i PPAs planlægning fremstilles som i *Figur 1*. For en mere indgående beskrivelse af processen jf. Larsen (2005).



Figur 1 Tidsmæssigt forløb for planlægning i PPA.

SimS rolle i PPA er simulering af afviklingen af udarbejdede planer i processen, enten hypotetiske planer eller i arbejdet hen mod de endelige planer. Derved er arbejdet med SimS placeret efter "Opbygning af tjenester og ture", og inden driften og disponeringen.

Køreplan, materielkøreplan og tjenesteplan er inddata til SimS, jf. *Grundlaget for SimS* nedenfor. En køreplan er overordnet set det som publikum får at se, dog specificeret mere detaljeret for hvert tog på hver linje med standsninger og tider. En materielkøreplan er en plan for hvordan materiellets omløb er, og deraf bestemmelse af materielbehovet, dog uden at det konkrete fysiske materiel kendes. En tjeneste er én arbejdsdag for én lokomotivfører (lkf). Disse udarbejdes ved anvendelse af et optimeringsværktøj der på dagsbasis kombinerer togekørslen i det færrest mulige antal tjenester, under overholdelse af regler for den enkelte tjeneste. En tur er en ugebaseret rulleplan af arbejde for en gruppe af lkf bestående af et helt antal uger.

På grund af den sekventielle struktur af planlægningsprocessen påbegyndes arbejde med tjenesteplaner først når materielplanen ligger færdig. Dette kan være et udkast eller en produktionsplan.

Målet med SimS er at give en vurdering af kvaliteten af samspillet mellem planerne, hvor *regularitet* og *pålidelighed* er to umiddelbare målbare tal for dette. Regularitet angiver andelen af tog, som er rettidige inden for 2,5 minut ved ankomst til en station. Pålidelighed angiver andelen af tog, som ikke aflyses. Ved disse to tal kan man definere én form for robusthed overfor driftsforstyrrelser. Der tænkes i den forbindelse ikke på store forstyrrelser, men på de mindre hændelser der forekommer

dagligt, fx mindre forsinkelser grundet passagerforhold eller pludseligt opstået fravær eller forsinkelse i lkf-styrken. I arbejdet med planer er det vigtigt at mindre hændelser ikke får en uforholdsmæssig stor indflydelse på togenes drift. Det er ikke målet at SimS skal kunne tage hensyn til de store driftsforstyrrelser der forekommer fra tid til anden. Det skyldes at en lang række faktorer og handlinger så kommer i spil som modellen ikke er bygget til at varetage. Afhængig af den konkrete forstyrrelse vil der i praksis iværksættes forskellige handlinger. Hvis SimS skulle varetage dette, ville det blive et generelt værktøj, hvilket på ingen måde er ambitionen med SimS.

Det er hensigten at anvende færrest mulig personaleressourcer til afviklingen. Det er dog for ensidigt at fokusere alene på det planlagte antal førere for en dag, idet afviklingen sjældent går som planlagt. Forsinkelser opstår i løbet af en dag, og pga. fysiske omstændigheder eller regler, er det ikke altid muligt at en fører kan køre det planlagte tog. Derfor er der allokeret en række rådighedsvagter der på afviklingsdøgnet er klar til at køre tog med få minutters varsel. Pga. modellens opbygning kan allokering af rådighedsvagter på afviklingsdagen i et vist omfang evalueres.

Et driftsdøgn i S-tog følger ikke kalenderdøgnet, men begynder kl. 3:00, og det første tog typisk afgår ca. kl. 4:40. Som det også fremgår af en publikumskøreplan så er der tre dagstyper for S-tog benævnt hverdag, lørdag og søndag. Der er dog et vist sammenfald i produktionen for dagstyperne.

Det er hensigten at anvendelsen af SimS skal være for både normalplaner og særplaner. En normalplan er grundplan for året, og afvikles hvis infrastrukturen er uden ændringer. Særplaner er tilpasning af normalplaner til den aktuelle situation, typisk sporarbejder, der måtte være.

## Grundlaget for SimS

Udviklingen af SimS er foretaget af en ekstern leverandør i tæt samarbejde med PPA. På sigt skal modellen videreudvikles og vedligeholdes i PPA.

### *Inddata*

Modellen indeholder både infrastruktur, dvs. linjeføring og stationer, og detaljer om lkf. Inddata kan vi her dele i to dele, dels inddata der sjældent ændres, dvs. typisk kun ved ændring i normalplanen, dels inddata der opsættes ved hver simulation. I denne artikel vil vi ikke komme nærmere ind på data i første kategori i detaljer, men fokusere på anden kategori.

Til første kategori hører:

- Banestrækninger og sektionsinddelinger
- Stationer, depoter og antal perroner
- Køretider mellem stationer, opholdstid og vendetid
- Arbejdsregler for lkf

Til anden kategori hører:

- Køreplan og materielkøreplan
- Tjenesteplan
- Forsinkelser af tog og personale

Planerne er anonyme i den forstand, at modellen kun anvender numre til henholdsvis tog og lkf. Materiellets type og lkf's kendskab til strækninger og materiel mm. er irrelevant i modellen.

## Køreplan og Materielplan

Som nævnt er en køreplan overordnet set det som publikum får at se, men specificeret for hvert tog på hver linje med standsninger og tider. Hvert tog er entydigt identificeret med et tognummer, og på en hverdag er der ca. 1.200 tognumre i brug. Et tognummer identificerer linje, endestationer, køreretning og tidspunkt. Et udsnit af en køreplan ses i Tabel 1:

**Tabel 1 Tre standsninger for ét linje-A tog**

*10116	123456()	P
UND		05:09
IH	05:11:30	05:12
VLB	05:14:30	05:14:30
BSA	05:16:30	05:16:30

Eksemplet beskriver det (P)ersonførende tog med nummer 10116 der afgår kl. 5:09 fra Hundige (UND) mandag til lørdag (123456()), og standser ved Ishøj (IH), Vallensbæk (VLB) og Brøndby Strand (BSA). For den komplette beskrivelse af 10116 er der yderligere 24 indgange der beskriver dens tider til Hillerød (Hi). Tider for ankomster og afgang er her anført med en nøjagtighed på ½ minut i modsætning til publikumskøreplanen, som kun giver hele minuttal og som desuden kun indeholder afgangstidspunkter. I Hillerød vender toget og får et nyt tognummer (10221), som er beskrevet tilsvarende mellem start- og slutstation.

Materielkøreplanen er en liste af omløb for materiellet uden at det konkrete fysiske materiel kendes. Et omløb er en serie af tognumre som er sammensat sådan at endestationen for et tognummer er startstation for det efterfølgende tognummer. Således vil man kunne indsætte et bestemt stykke materiel som derved kan køre de pågældende tognumre i et omløb over driftsdøgnet. Et uddrag af et omløb kunne se ud som i Tabel 2:

**Tabel 2 Begyndelse af ét stammeomløb**

48	123456	05:09	10116	10221	10124	10229	10132	...
----	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----

Det beskriver materielomløb nummer 48 som gælder mandag til lørdag, og starter op 05:09 som tognummer 10116 på Hundige station.

## Tjenesteplan

En tjeneste er, som nævnt ovenfor, én arbejdsdag for én lkf, og indgår i en tjenesteplan. Tjenesten består af en liste af enkelt opgaver. Tabel 3 viser et uddrag af én tjeneste:

**Tabel 3 Uddrag af én tjeneste i tjenesteplanen**

CIN	03:59	04:14	Kh	Kh	
TAXI	04:18	04:39	Kh	Und	
TFF	05:09	05:34	Und	Kh	10116
TFF	05:35	06:14	Kh	Hi	10116
TFF	06:24	07:05	Hi	Kh	10221
PAU	07:22	07:52	Kh	Kh	
TFF	07:57	08:25	Kh	Hot	60123

Alle tjenester starter med 15 minutters Check-IN tid (CIN). I Tabel 3 mødes på Kh, og der køres i taxi til Hundige. I eksemplet følger TogFremFøring (TFF) til Kh, videre til Hillerød hvor toget vender og tilbage til Kh. Der holdes pause (PAU) fra 7:22 til 7:52, hvorefter der føres tog til Holte(Hot). Den fulde tjeneste indeholder yderligere fire indgange. Mellem de angivende tider i tabellen afvikles en række opgaver, der er mindre relevante for modellen, såsom gåtider, vendetider, holdetider mv. Der er uden for artiklens rammer at komme ind på yderligere detaljering af tjenesten.

Udover lkf'er med planlagte tjenester, findes også en gruppe af rådighedsvagter hvis opgaver er at dække kørsel, hvor en planlagt fører mod forventning ikke er tilgængelig. Det angives ligeledes i modellen hvornår disse møder, men ved opstart af modellen er der ikke kendskab til hvad de kommer til at fremføre.

En typisk køreplan er på ca. 34.000 indgange, og en materielkøreplan ligger typisk på ca. 80 for en hverdag. En samlet tjenesteplan har op i mod 3.400 indgange.

## **Forsinkelser af tog og personale**

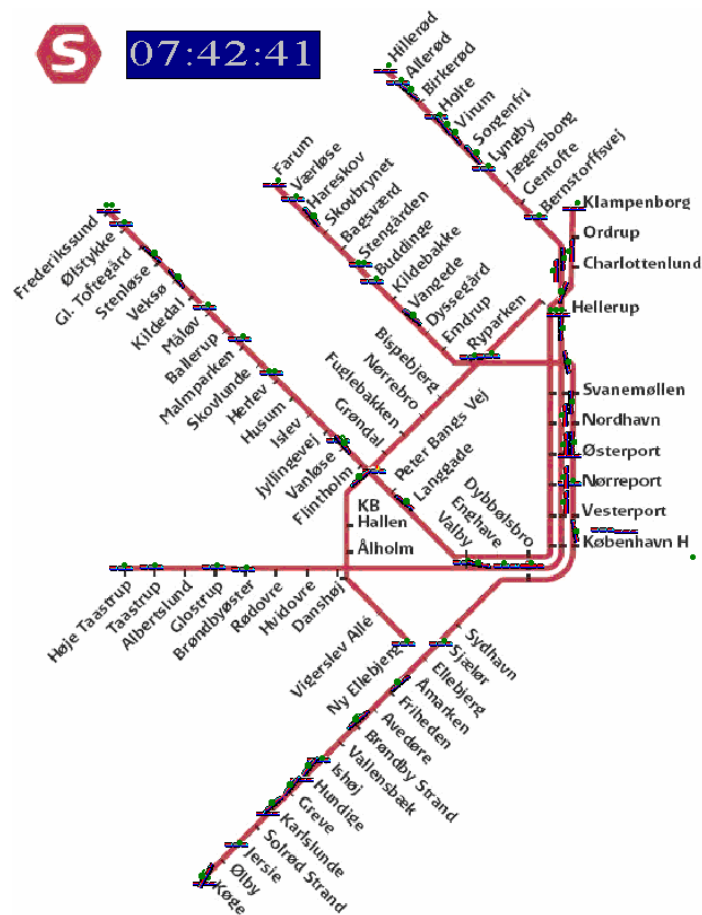
Tiden fra ankomsten af et tog til en station til ankomsten af toget til den efterfølgende station modelleres i SimS ved en (minimum) opholdstid på stationen, en (minimum) køretid mellem stationerne samt en "ekstra tid". En køreplan er normalt opbygget således at der er plads til noget ekstra tid uden forsinkelser forekommer. Ekstra tid kan fx forekomme ved passagerforhold med mange ind- eller udstigninger, ved handicapforhold og ved materielle fejl. Ekstra tiden beskrives i SimS ved en normalfordeling. Driftsdøgnet er inddelt i 24 intervaller af én time. For hver station og for hvert timeinterval specificeres parametrene i normalfordelingen for ekstra tiden. Der er desuden muligt at angive andelen af tog, der skal påvirkes med en ekstra tid. Ud fra den aktuelle drift i 1. kvartal 2006 er parametrene estimeret. Det er naturligvis muligt at tilpasse parametrene til andre driftsdata og foretage justeringer for at se effekten af hypotetiske indsatsområder i driften

Til forsinkelse af mandskab er mulighederne delt i følgende typer, *LateSignOn*, *EarlySignOff* og *Absent* der dækker over henholdsvis møde for sent til tjeneste, for tidlig afslutning af tjeneste, fx gået syg hjem, og fraværende hele dagen fx syg. For hver type er det muligt at angive andelen af førere der skal påvirkes, og for *LateSignOn* desuden en fordeling for deres forsinkelse. Fordelingen for *LateSignOn* er estimeret til en lognormal-fordeling, og er baseret på data fra medio 2005 til primo 2006. Til de forskellige forsinkelser er det muligt at angive forskellige parametre for henholdsvis de faste lkf og rådighedsvagterne.

## ***Simulationsmodellens opbygning***

Modellen består af en logik og en animation. Den logiske del er selve simulationen, mens animationen giver et visuelt indtryk af afviklingen.

Infrastrukturen i modellen er en tilnærmelse af virkelighedens infrastruktur. I *Figur 2* ses en tilstand af simulationen illustreret ved animationen. Den underliggende "fingerstruktur" er fra den såkaldte "julekøreplan" der iværksættes i forbindelse med ekstra nat-kørsel op til jul.



**Figur 2 Animation af igangværende simulation i SimS**

Køreplanen og materielkøreplanen definerer, som omtalt, hvordan togene starter op, afgang, standser og vender til ethvert tidspunkt. Planerne er genereret i et planlægningssystem der sikrer indbyrdes konsistens, hvilket derfor ikke verificeres i simuleringssmodellen. Ligeledes er tjenesteplanen udarbejdet i relation til den pågældende køreplan og materielkøreplan i et planlægningssystem, så konsistens mellem disse planer verificeres heller ikke i modellen.

Modellen er pt. kun bygget til at simulere ét driftsdøgn ad gangen i overensstemmelse med planlægningen i PPA. Når døgnnet starter er en del af togene parkeret på endestationer, mens resten står på Kh.

Når et tog er i drift og skal kunne ankomme til en station, skal der være plads ved en perron, og den pågældende perron skal have været forladt i et vist tidsrum før ankomst. Det er gældende sikkerhedsregler for togdriften som er implementeret i modellen i relation til de virkelige værdier. Antallet af tog mellem to stationer er også begrænset, og defineret i modellen. Således kan en spærret station forplante forsinkelser gennem netværket.

Lkf kan møde tre steder i netværket, Kh, Hi og Køge (Kj). For den del af mandskabet som, på grund af arbejdsregler, møder på Kh, starter en del af de første tjenester med en transport ud til togene ved endestationerne med taxa. Disse kørsler simuleres også, men animeres ikke. En taxa kan i modellen ikke blive forsinket.

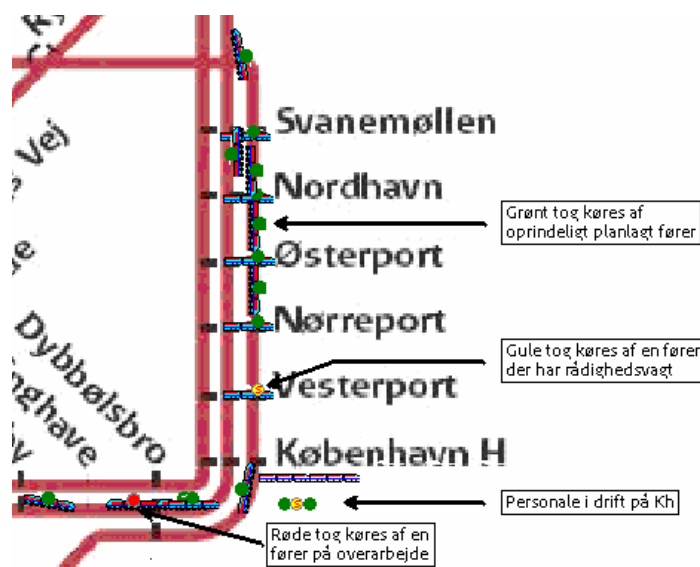
Mandskabet møder således ind i henhold til deres arbejdstid i tjenesteplanen. For hvert møde af en lkf vil denne med en vis sandsynlighed være *Absent*. Hvis en lkf ikke kan nå at køre sit første tog pga. *LateSignOn*, vil en rådighedsvagt træde til. Når pågældende lkf så er klar til at køre tog, vil vedkommende blive rådighedsvagt. Er en rådighedsvagt ikke tilstede når en fører mangler vil modellen indsætte en såkaldt *virtuel fører*, som i et omfang kan opfattes som en aflysning af toget eller overarbejde pga. mandskabsmangel. Når en lkf der fremfører tog kommer ind til en pause, vil han med en sandsynlighed, som dog er forholdsvis lille, foretage *EarlySignOff*.

I den eksisterende version af modellen er det lkf der er entiteterne, hvilket betyder at det er lkf der er de igangsættende enheder i modellen. Togene er transportører, hvilket vil sige at de medbringer en fører fra station til station. Køretiderne mellem stationerne er det togets ansvar at holde rede på. Da tjenesterne typisk udarbejdes så lkf sidder i samme fysiske tog mellem blokke af fremføring, vil følgevirkningen af at en lkf der bliver forsinket af den ene eller anden grund, være at hans pause rykkes, eller at han får senere fri. I modellen er lkf implementeret meget fleksibelt, og ved forsinkelse før en pause rykkes slutningen af pausen ikke, men pausen forkortes derimod. Ekstreme forsinkelser, der er længere end pausen, forekommer yderst sjældent. Det registreres dog af simuleringen at en lkf har fået forkortet sin pause. Hvis en lkf får senere fri end planlagt registreres dette også.

Under afviklingen af driftsdøgnet måles *regularitet* og *pålidelighed*. Den præcise beregning af de to mål vil vi ikke gennemgå her. Tallene er to målstyringstal der gøres op i henhold til DSB S-togs trafikkontrakt med Transport og Energiministeriet. Regulariteten er rettighed af den faktiske gennemførte trafik, dvs. de togafgange der er mindre end 2,5 minut forsinket i henhold til gældende køreplanen for den pågældende dag. Pålidelig er størrelsen af den faktiske gennemførte trafik i køreplanens planlagte trafikomfang, og fokusere således på omfanget af aflysninger.

Ved brug af en virtuel fører indgår regulariteten for det pågældende tog ikke i den samlede regularitet. Men da toget ikke tages ud af driften i modellen kan det godt være med til at forsinke andre tog, hvilket må betegnes som en uhensigtsmæssighed i modellen.

I *Figur 3* er et udsnit af animationen af en simulation for området omkring Kh med angivelse af de forskellige typer førere.



Figur 3 Udsnit af Animation i SimS

Modellen er udarbejdet i simuleringsskemaet Arena fra Rockwell Software. Ved opstarten af simuleringen angives antallet af replikationer som man ønsker at modellen skal køre, for at få rimeligt pålidelige estimater af modellens resultater. En kørsel uden animation tager typisk under 1 minut.

## Uddata

Som omtalt i afsnittet *Simulationsmodellens opbygning* opsamles en række data under afviklingen af simulationen. De planlagte og afviklede tider i køreplanen og tjenesteplanen angives i en log-fil. Derved kan man se præcis hvilken afgang eller lkf der blev forsinket.

På grund af størrelsen af køreplan og af tjenesteplan summerer modellen også en række tal på forskellige detaljeringsniveauer. Da fokus ofte er på regularitet og pålidelighed samles disse tal i en række regneark efter hver kørsel. Tallene opgøres for alle replikationer og på hver af de strækninger der er defineret i modellen. Dette er tal der kan sammenlignes direkte med tallene fra virkeligheden. Antallet af forkortelser af pauserne og brud på implementeret arbejdsregler opgøres også.

Alt uddata kan efterfølgende anvendes af en planlægger ved en evaluering af den enkelte plans kvalitet.

## Resultater og igangværende arbejde

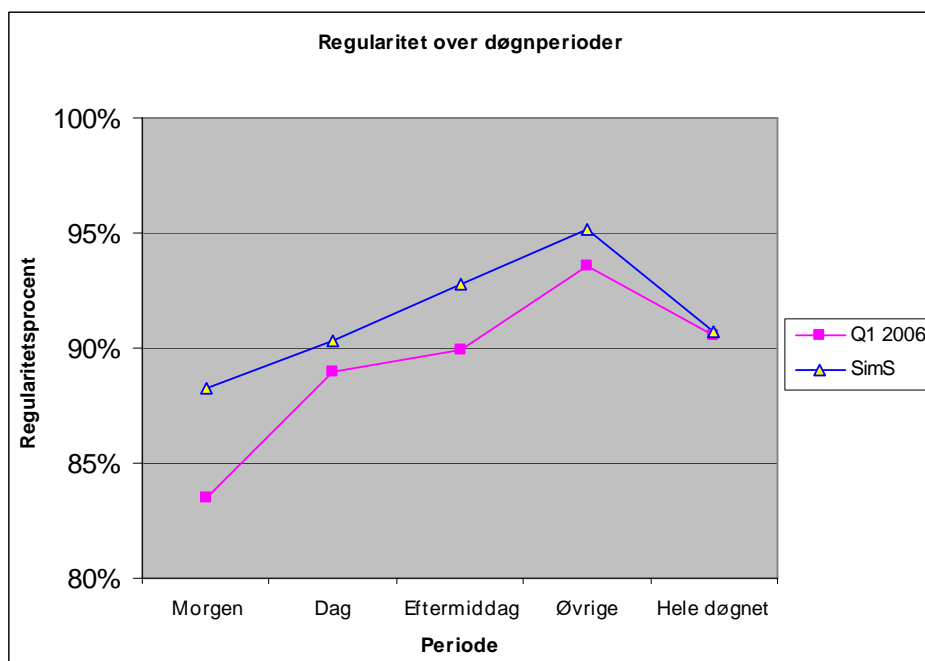
Generelt giver modellen en forholdsvis lav regularitet sammenlignet med virkeligheden. Vi mener at der er en række forskellige årsager til dette, hvor vi kun vil omtale to her. Det kan nævnes at påvirkninger på stationer for tog i modellen pt. ikke er retningsopdelt, og derfor kan én gennemsnitsværdi for begge retninger give unødige spredning af forsinkelser grundet den stramme planlægning i køreplanen. Yderligere kan det at alle tog køres betyde en forplantning af forsinkelser som ellers forsvinder i den daglige drift når tog tages ud. Vi har justeret parametrene for påvirkninger i modellen sådan at den samlede regularitet kan sammenlignes direkte med regulariteten for driften i 1. kvartal 2006.



Hofman et al. (2005) har undersøgt forskellige genopretningsstrategier og robusthed for hypotetiske køreplaner under påvirkning af tog alene og ikke af lkf. De fandt at mindre forsinkelser på togdriften førte mange følgeforsinkelser med sig, og at det var de store påvirkninger der påvirkede regulariteten mest. De undersøgte også vigtigheden af forskellige genopretningsstrategier og den resulterende regularitet, som følge af iværksættelse af disse strategier. Aflysninger og vending af tog havde stor betydning for regularitetsforøgelse. Strategier som ikke er implementeret i SimS.

Yderligere er pålideligheden i SimS relativ høj hvilket formentligt skyldes en modellering af urealistisk velvillige lkf'er, samt at ingen tog tages ud af drift i modellen pga. nedbrud. Da pålideligheden i modellen er en summering af anvendelse af virtuelle fører, og disse i modellen kun bliver brugt når en lkf møder for sent, er det ikke en realistisk måling af den virkelige pålidelighed. Nedbrud af tog eller aflysninger af hele linjer på grund af ekstrem trafiksituation, simuleres ikke.

For at vurdere modellens troværdighed i henhold til regularitet, har vi kørt forskellige scenarier og analyser på kendt afvikling, og sammenlignet resultaterne med virkelige data. Et resultat af dette er en måling af regulariteten i de forskellige døgnintervaller som de opgøres internt i virksomheden. Der arbejdes med fire intervaller, *morgen*, *dag*, *eftermiddag* og *øvrig*. Der blev genereret fire instanser hvor forsinkelser kun blev påvirket i de givne intervaller, og togenes regularitet i de pågældende intervaller blev opgjort. Inddata til modellen er dog ikke implementeret med henblik på præcis sådan en analyse, idet døgnintervallerne i S-tog defineres på baggrund af tognumre, og ikke i tidsintervaller. Resultatet af simuleringerne er sammenholdt med resultaterne af driften for 1. kvartal 2006 i *Figur 4*.



**Figur 4 Regularitet over døgnintervaller**

Det må udledes at regulariteten over døgnperioder i SimS afspejler de samme tendenser som den faktiske regularitet.

Af yderligere analyser kan nævnes en analyse af behovet for rådighedsvagter. På baggrund af anvendelsen af virtuelle førere i SimS og ved brug af andre modeller i PPA bestemmes det samlede behov og placeringen af rådighedsvagter for et døgn. Arbejdet er igangværende.

PPA arbejder også med evaluering af bufferstørrelser i tjenester, hvor der er eksperimenteret med forskelligt antal minutter uden opgaver op til en tjeneste, sådan at mindre forsinkelser kan absorberes af tjenesterne.

## Aktuel tilstand for udviklingen

Et mål med modellen er at anvende den i forbindelse med køreplanen der skal træde i kraft i august 2007. Modellen er i dag justeret til regulariteten for de planer vi afvikler i dag. Vi forventer at arbejde med udvidelsen og tilpasningen af modellens logik, som finder i sted efteråret 2006, vil højne niveauet af troværdighed for modellen. Fokus for den fortsatte udvikling af modellen vil også fremover blive en styrkelse af troværdigheden af måltallene. Vi mener dog godt at modellen kan bruges ved en relativ sammenligning mellem planer med forskellige karakteristika.

Af udvidelser til modellen kan nævnes en tilpasning af inddata, sådan at døgnregularitet kan måles i relation til den korrekte interne definition i virksomheden. Derudover udvides modellen også til at omfatte togene til at være entiteter, sådan at fokus i driften er på togene. Tog skal dermed være den styrende enhed. Yderligere vil forsinkelser på stationer blive retningsopdelt, da data fremviser en forholdsvis stor forskel på forsinkelserne på nogle stationer. Modellen udvikles yderligere med henblik på en mere realistisk beskrivelse af lkf handlinger i forbindelse med forsinkelser før pauser. Modellen udbygges blandt andet til at omfatte en sandsynlighed for at en lkf vil bryde sin pause.

Da modellen har været under udvikling og derfor primært har været anvendt af analytikere, er en umiddelbar opgave i nærmeste fremtid en overførsel til produktionen, og en udarbejdelse af interface til uddata for brugerne. Brugere er i første omgang planlæggere, og interfacet skal derfor designes i samarbejde med dem sådan at SimS får en nyttevirkning i det daglige arbejde med at vurdere planers robusthed. Pga. den detaljerede logning af de afviklede simulationer er PPA i stand til at generere en lang række af de rapporteringer som planlæggerne måtte ønske.

## Litteraturliste

1. S. LARSEN, Anvendelse af OR-metoder til planlægningen i S-tog, *Trafikdage 2005*, <http://www.trafikdage.dk/papers/soeg/Paper.asp?PaperID=1176>
2. M. Hofman, L. Madsen, J. Groth, J. Clausen and J. Larsen, Robustness and Recovery in Train Scheduling - a Case Study from DSB S-tog a/s, *ATMOS, 2006*, <http://algo06.inf.ethz.ch/atmos/accepted-papers>